

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.017

引用格式:包志鹏,林栋,刘雪鹏,等.放牧强度对高寒草甸土壤有机碳及其组分的影响[J].草地学报,2026,34(1):172—181
BAO Zhi-peng, LIN Dong, LIU Xue-peng, et al. Effects of Grazing Intensities on Soil Organic Carbon and its Fractions in Alpine Meadows[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):172—181

放牧强度对高寒草甸土壤有机碳及其组分的影响

包志鹏^{1,2}, 林 栋^{1,2*}, 刘雪鹏^{1,2}, 罗薇薇^{1,2}, 宋一诺^{1,2}, 花欣颖^{1,2}

(1. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为评估放牧对草地土壤碳库的潜在影响,研究了不同放牧强度对高寒草甸土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)及其组分颗粒有机碳(Particulate organic carbon, POC)、矿物结合有机碳、轻组有机碳、重组有机碳、易氧化有机碳(Easily oxidation organic carbon, EOC)和溶解性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)含量的影响。结果表明:随放牧强度的增大,土壤SOC及其组分含量显著下降(除EOC, DOC外),有机碳库稳定性降低。SOC和POC含量在极度放牧条件下,比轻度放牧分别显著降低了33.54%和56.21%。EOC/SOC, DOC/SOC占比对放牧强度的响应波动较大,可作为评价放牧影响高寒草甸土壤碳库的重要指标。SOC及其组分含量与土壤全氮含量、容重和地上生物量显著相关,其中全氮是影响SOC及其组分含量的关键因子。适宜的放牧强度对维护和提升高寒草甸土壤质量和碳库功能至关重要,过度放牧降低了SOC积累和稳定性,研究为东祁连山高寒草甸放牧和土壤有机碳库管理提供了科学依据。

关键词:放牧强度;高寒草甸;土壤有机碳;有机碳组分;物理化学分组

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0172-10

Effects of Grazing Intensities on Soil Organic Carbon and its Fractions in Alpine Meadows

BAO Zhi-peng^{1,2}, LIN Dong^{1,2*}, LIU Xue-peng^{1,2}, LUO Wei-wei^{1,2}, SONG Yi-nuo^{1,2}, HUA Xin-ying^{1,2}

(1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu Province 730070, China;

2. Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Lanzhou, Gansu Province 730070, China)

Abstract: To evaluate the potential impacts of grazing on grassland soil carbon pools, this study investigated the effects of different grazing intensities on the contents of soil organic carbon (SOC) and its fractions—including particulate organic carbon (POC), mineral-associated organic carbon, light fraction organic carbon (LFOC), heavy fraction organic carbon (HFOC), easily oxidizable organic carbon (EOC), and dissolved organic carbon (DOC)—in alpine meadows. The results showed that with increasing grazing intensities, the contents of SOC and most of its fractions significantly decreased (except for EOC and DOC), and the stability of the organic carbon pool declined. Under extreme grazing, SOC and POC contents were significantly reduced by 33.54% and 56.21%, respectively, compared with light grazing. The ratios of EOC/SOC and DOC/SOC exhibited significant fluctuations in response to grazing intensity, making them important indicators for evaluating the impacts of grazing on soil carbon pools in alpine meadows. The contents of SOC and its fractions were significantly correlated with soil total nitrogen (TN) content, bulk density (BD), and aboveground biomass (AGB), with TN being the key factor influencing SOC and its fractions. Appropriate grazing intensity is crucial for main-

收稿日期:2025-01-16;修回日期:2025-03-06

基金项目:国家自然科学基金项目(32260354);兰州市青年科技人才创新项目(2023-QN-46);甘肃农业大学草学学科草地生态与管理重点团队建设项目(2500011004);草业生态系统教育部重点实验室开放课题(KLGE202209);“揭榜挂帅”项目(KLGE-2024-01)资助

作者简介:包志鹏(2000-),男,汉族,安徽池州人,硕士研究生,主要从事草地土壤碳循环研究, E-mail:2571936409@qq.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail:lind@gsau.edu.cn

taining and enhancing soil quality and carbon pool functions in alpine meadows, as overgrazing reduces SOC accumulation and stability. This study provides a scientific basis for grazing management and soil organic carbon pool conservation in alpine meadows of the East Qilian Mountains.

Key words: Grazing intensity; Alpine meadow; Soil organic carbon; Organic carbon fraction; Physical-chemical fractionation

草地是陆地生态系统的重要组成部分,其碳库储量占陆地生态系统碳库储量的1/3,是大气CO₂的重要碳汇,在全球碳循环中具有重要作用^[1]。青藏高原是草地生态系统的重要组成部分,其广泛分布高寒草原、高寒草甸与高寒沼泽草甸草地等草地类型^[2]。位于青藏高原东北缘的祁连山,是我国西部重要的生态安全屏障,高寒草甸是该区域主要的植被类型之一。近几十年来,受全球气候变暖和人类生产活动等影响,祁连山高寒草甸生态系统功能发生了显著变化。

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)库是地球陆地生态系统最大的碳库,其碳储量是大气碳库和生物碳库的2~3倍^[3-4]。SOC既是大气中CO₂的“源”,也是CO₂重要的“汇”^[5]。SOC含量是评价土壤质量的重要指标,更是反映生态系统健康与稳定的关键因素^[6]。目前根据其周转活性和稳定性的不同,学界普遍按照土壤的物理和化学特性进行土壤有机碳分组。按照土壤粒径可将SOC分为颗粒有机碳(Particulate organic carbon, POC)和矿物结合有机碳(Mineral-associated organic carbon, MAOC)^[7];按照密度可分为游离的轻组有机碳(Light fraction organic carbon, LFOC)和密度相对较高的重组有机碳(High fraction organic carbon, HFOC)^[8]。根据不同化学性质(如溶解性、水解性和氧化性等)可将SOC分为易被化学氧化剂氧化和分解的易氧化有机碳(Easily oxidation organic carbon, EOC)^[9]和易溶于水或盐溶液的溶解性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)^[10]。

放牧是当前草地管理和利用的主要方式之一,放牧动物的采食和践踏等行为会改变植物群落物种组成、土壤理化性质、微生物群落以及凋落物蓄积量,从而直接或间接影响土壤碳循环^[11-12]。不合理的放牧管理不但会降低草地的生产力、生物多样性和土壤碳储量,而且会加速土壤CO₂的排放^[13]。已有研究表明,放牧强度显著影响土壤有机碳库及其不同组分。Zhou等^[14]综合了全球223项草原研究数据发现,草原放牧后土壤碳库储量显著降低了2.9%。杨合龙等^[15]对昭苏草甸草原的研究发现,放牧强度

增加显著降低了土壤活性有机碳组分含量;Wen等^[16]对贺兰山草原和荒漠草原的研究发现,放牧使得SOC和POC含量逐渐减少,禁牧情况下POC含量则显著增加;而Cao等^[17]对内蒙古荒漠草原的研究发现,SOC及其组分对不同放牧变化响应显著,随着放牧强度的增加,轻度放牧、中度放牧和重度放牧的POC、LFOC和EOC含量都随之降低,而禁牧和轻度放牧下的POC含量均显著高于中度和重度放牧。目前,对于土壤有机碳及其组分的研究,国内外多集中于典型草原和荒漠草原,而有关放牧强度对高寒草甸土壤有机碳及其组分的研究较少。因此,探究放牧强度对高寒草甸土壤有机碳库组分的变化及其与植被和土壤因子间的相互关系,可为高寒草甸生态系统碳循环和碳固存提供数据支撑,为合理利用草地资源和实现可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山东段的天祝藏族自治县,平均海拔2960 m。研究区属于典型的高原气候,寒冷潮湿,雨热同期,无绝对无霜期。研究区气温介于-11.4℃~11.2℃之间,平均气温0.16℃,年均降雨量416.9 mm。土壤类型属高山黑钙土,草地类型为高寒草甸,优势物种主要有垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、异针茅(*Stipa aliena*)和矮生蒿草(*Kobresia humilis*)等。

1.2 样地设置与样品采集

于2023年8月上旬在甘肃省天祝藏族自治县,依据草地利用状况和草地植被调查,结合入户走访和文献资料,选取背景值一致且具有代表性的5个不同放牧强度高寒草甸样地:常年禁牧(CK)(0羊·hm⁻²·a⁻¹)、轻度放牧(LG)(2.24羊·hm⁻²·a⁻¹)、中度放牧(MG)(4.17羊·hm⁻²·a⁻¹)、重度放牧(HG)(5.25羊·hm⁻²·a⁻¹)、极重度放牧(EG)(7.86羊·hm⁻²·a⁻¹),每个放牧强度设置5个重复样地。每个样地选取1 m×1 m的面积进行样方调查并采

集地上生物量(Aboveground biomass, AGB)样地内沿“S”形选取15个点,采集0~20 cm土样。用于DOC测定的土样过2 mm筛后在-80℃冰箱中保存,用于土壤全氮、全磷、pH值、SOC、POC、MAOC、LFOC、HFOC和EOC测定的土样自然风干后磨碎过2 mm、0.15 mm筛。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤理化性质测定 土壤理化性质测定方法参考鲍士旦^[18]《土壤农化分析》,土壤pH值采用电位法测定;土壤含水量(Water content, WC)采用105℃烘干法测定;土壤容重(Bulk density, BD)采用环刀法;全磷含量(Total phosphorus, TP)采用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定。土壤全氮(Total nitrogen, TN)含量采用全自动氮/形态碳分析仪(Primacs 100, Skalar, Netherlands)。

1.3.2 土壤有机碳及其组分测定 土壤总有机碳(SOC):用盐酸去除无机碳,用TOC分析仪(Multi N/C 2100S Germany,下同)高温燃烧测定。

颗粒有机碳(POC)和矿物结合有机碳(MAOC):参考Cambardella^[19]等的方法,用5 g·L⁻¹六偏磷酸钠振荡分散(18 h, 90 r·min⁻¹),悬液过53 μm筛,蒸馏水反复冲洗,筛上部分为颗粒有机质,65℃烘干至恒重,TOC分析仪测定土壤颗粒有机碳含量,差减法计算矿物结合有机碳含量。

轻组有机碳(LFOC)和重组有机碳(HFOC):用1.8 g·cm⁻³的NaI溶液振荡分散^[8],悬浮液3000 r·min⁻¹离心10 min后抽滤,微孔滤膜上的轻组部分先用0.01 mol·L⁻¹的CaCl₂溶液冲洗再用蒸馏水冲洗,65℃烘干至恒重,TOC分析仪测定土壤轻组有机碳含量,差减法计算重组有机碳含量。

易氧化有机碳(EOC):采用高锰酸钾氧化法^[9],过0.15 mm筛的风干土样用333 mol·L⁻¹的高锰酸钾溶液振荡1 h后离心5 min,上清液用去离子水1:250稀释,在波长565 nm下测定吸光值。

溶解性有机碳(DOC):采用硫酸钾浸提法^[20],过2 mm筛的风干土样(土水比1:4),用0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄盐溶液在25℃下恒温振荡16 h离心5 min,0.45 μm滤膜抽滤后,用TOC分析仪测定有机碳含量。

1.4 数据处理

运用Excel和SPSS26进行数据统计,以平均

值±标准误差(Mean±SE, $n=15$)表示结果,采用单因素方差(One-way ANOVA)和最小显著差异比较法(LSD)检验数据之间的差异显著性,采用皮尔逊(Pearson)相关性分析土壤理化性质与有机碳及其组分的相关性,利用Canoco 5进行冗余分析。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量和基本理化性状变化

研究区高寒草甸SOC含量为51.68~83.12 g·kg⁻¹,随着放牧强度的增加,SOC含量呈下降趋势,依次为:CK>LG>MG>HG>EG(图1)。HG和EG处理下,SOC含量显著低于CK,分别降低了25.15%和37.83%($P<0.05$)。EG亦显著低于LG和MG,分别降低了33.54%,29.47%($P<0.05$)。

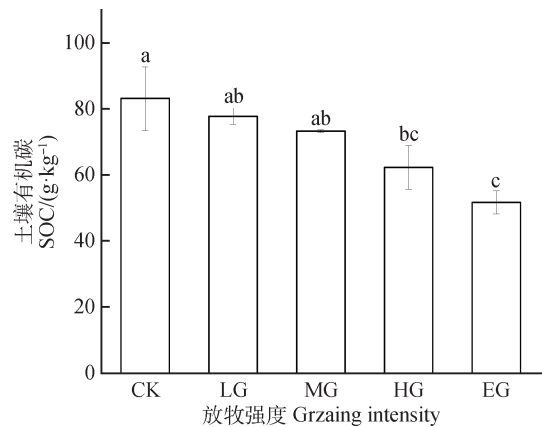


图1 不同放牧强度高寒草甸土壤有机碳含量

Fig. 1 Soil organic carbon content in alpine meadows under different grazing intensities

注:同列不同小写字母表示不同放牧强度间差异显著($P<0.05$),下同

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different grazing intensities at 0.05 level, the same as below

由图2可知,高寒草甸地上生物量随放牧强度的增加逐渐降低,CK条件下最高为593.78 g·m⁻²,EG最低为50.66 g·m⁻²,LG, MG, HG和EG处理下均显著低于CK,EG仅为CK的1/9($P<0.05$)。在EG处理下,高寒草甸地上生物量亦显著低于LG,为LG的1/4($P<0.05$)。

土壤相关理化性质由表1可知。土壤TN含量随放牧强度增加呈现下降趋势,在EG处理下,TN含量显著低于CK($P<0.05$)。土壤TP在LG, MG, EG处理下显著低于CK($P<0.05$)。在HG处

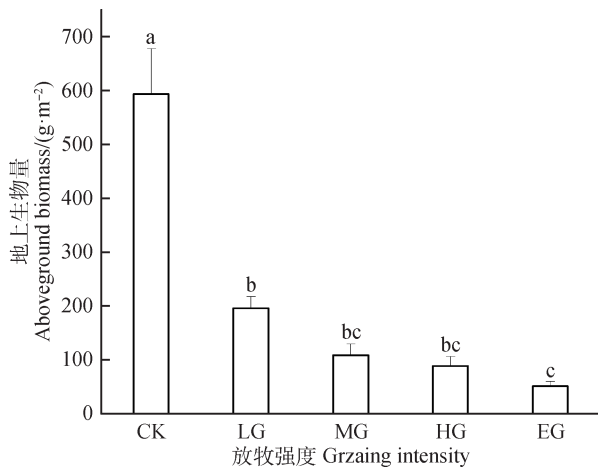


图 2 不同放牧强度高寒草甸地上生物量

Fig. 2 Aboveground biomass in alpine meadows under different grazing intensities

理下,土壤 BD 显著高于 LG, MG ($P < 0.05$); 在 EG 处理下,土壤 BD 亦显著高于 LG, MG ($P < 0.05$)。土壤含水率在 MG 处理下最低,显著低于 CK, LG, HG, EG ($P < 0.05$); 含水率在 LG 处理下,亦显著低于 CK, HG ($P < 0.05$)。土壤 pH 值范围为 6.82~7.60,高寒草甸土壤整体偏中性。

2.2 土壤有机碳组分变化

2.2.1 颗粒有机碳和矿物结合有机碳含量变化
由图 3 可知,研究区高寒草甸在不同放牧强度下,土壤 POC 含量均值介于 $7.01 \sim 16.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,依次为: LG > MG > CK > HG > EG。在 EG 处理下, POC 含量显著低于 CK, LG, MG, 分别降低了 47.88%,

56.21%, 51.72% ($P < 0.05$); 在 HG 处理下亦显著低于 LG, 降低了 30.04% ($P < 0.05$)。MAOC 含量随着放牧强度的增加而降低, MAOC 含量均值介于 $44.66 \sim 69.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。在 EG 处理下, MAOC 含量显著低于 CK, LG, 分别降低了 35.90%, 27.69%; HG 亦显著低于 CK, 降低了 26.78% ($P < 0.05$)。

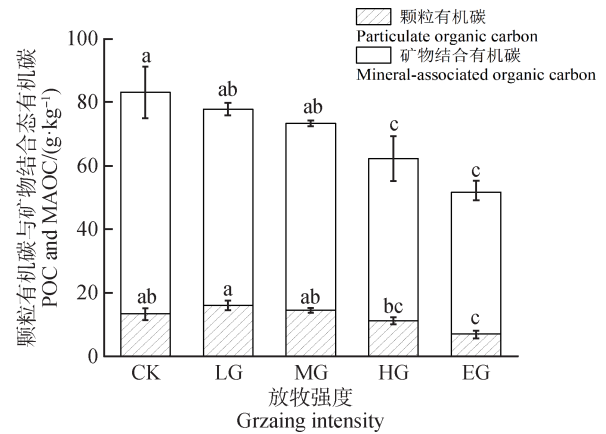


图 3 不同放牧强度高寒草甸土壤颗粒有机碳和矿物结合有机碳含量

Fig. 3 Soil particulate organic carbon and mineral-associated organic carbon content in alpine meadows under different grazing intensities

研究区高寒草甸在不同放牧强度下土壤 POC/SOC 比例变化范围为 12.29%~20.52%, MAOC/SOC 比例范围为 79.48%~86.71% (表 2)。随着放牧强度的增加, POC/SOC 比例呈下降趋势, 而 MAOC/SOC 比例则有上升的趋势。

表 1 不同放牧强度高寒草甸土壤基本理化性状

Table 1 Soil basic physical and chemical properties of alpine meadows under different grazing intensities

放牧强度 Grazing intensity	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	容重 BD/(g·cm ⁻³)	含水率 WC/%	pH 值
常年禁牧 CK	8.56±0.70 ^a	1.13±0.10 ^a	1.41±0.40 ^a	32.60±2.48 ^a	6.82±0.23 ^b
轻度放牧 LG	7.85±0.33 ^{ab}	0.79±0.03 ^b	0.98±0.04 ^b	20.63±0.98 ^c	7.37±0.06 ^{ab}
中度放牧 MG	7.85±0.08 ^{ab}	0.86±0.02 ^b	0.94±0.05 ^b	12.20±0.37 ^d	7.60±0.03 ^a
重度放牧 HG	6.57±0.87 ^{ab}	0.97±0.05 ^{ab}	1.41±0.06 ^a	27.20±2.87 ^{ab}	6.85±0.21 ^b
极重度放牧 EG	5.97±0.54 ^b	0.78±0.04 ^b	1.39±0.05 ^a	20.80±1.16 ^{bc}	7.25±0.22 ^{ab}

注: 同列不同小写字母表示不同放牧强度间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different grazing intensities at 0.05 level, the same as below

表 2 不同放牧强度高寒草甸土壤有机碳组分的分配比例

Table 2 Distribution ratio of soil organic carbon fractions in alpine meadows with different grazing intensities

放牧强度 Grazing intensity	占总有机碳含量的比例 Proportion of total organic carbon content/%						
	颗粒有机碳 POC	矿物结合有机碳 MAOC	轻组有机碳 LFOC	重组有机碳 HFOC	易氧化有机碳 EOC	溶解性有机碳 DOC	
禁牧 CK	13.29±1.25 ^a	86.72±1.25 ^a	18.07±0.62 ^a	81.93±0.62 ^a	10.61±0.44 ^{bc}	0.15±0.03 ^c	
轻度放牧 LG	19.62±4.16 ^a	80.38±4.17 ^a	16.06±2.03 ^a	83.95±2.03 ^a	7.50±0.23 ^d	0.30±0.02 ^b	
中度放牧 MG	19.83±0.89 ^a	80.17±0.89 ^a	15.55±0.42 ^a	84.45±0.42 ^a	8.55±0.12 ^{cd}	0.60±0.05 ^a	
重度放牧 HG	20.52±1.47 ^a	79.49±1.47 ^a	16.45±1.38 ^a	83.56±1.37 ^a	13.71±0.76 ^a	0.10±0.01 ^c	
极重度放牧 EG	16.11±0.99 ^a	83.89±0.99 ^a	19.54±2.93 ^a	80.47±2.93 ^a	10.71±0.97 ^{ab}	0.30±0.01 ^b	

2.2.2 轻组有机碳和重组有机碳含量变化 由图 4 可知,研究区高寒草甸在不同放牧强度下,土壤 LFOC 含量随着放牧强度的增加而降低,LFOC 含量均值介于 $9.26 \sim 15.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。在 MG,EG,HG 处理下,土壤 LFOC 含量显著低于 CK,较 CK 分别降低 27.34%,39.71%,40.98% ($P < 0.01$);EG,HG 处理亦显著低于 LG,分别降低 25.39%,26.97% ($P < 0.05$)。在不同放牧强度下,土壤 HFOC 含量也随着放牧强度的增加而降低,HFOC 含量均值介于 $42.42 \sim 67.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。在 EG 处理下,土壤 HFOC 含量达到最低值,且显著低于 CK,LG,MG,分别降低 37.09%,34.83%,31.45% ($P < 0.05$)。

研究区高寒草甸土壤 LFOC 占 SOC 的比例为 15.55%~19.54%,HFOC 占 SOC 的比例为 80.46%~84.45%,LFOC/SOC 和 HFOC/SOC 在不同放牧强度下表现出一定的波动(表 2)。但整体来看,放牧强度对高寒草甸土壤轻重组分有机碳的占比影响并不显著。

2.2.3 易氧化有机碳和溶解性有机碳含量变化 由图 5(A)可知,在不同放牧强度下,研究区高寒草甸土壤 EOC 含量,在 CK 条件下最高为 $8.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,在 EG 处理下最低为 $5.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤 EOC 含量大小变化依次为:CK>HG>MG>LG>EG。在 EG 处理下,土壤 EOC 含量显著低于 CK,EG 仅为 CK

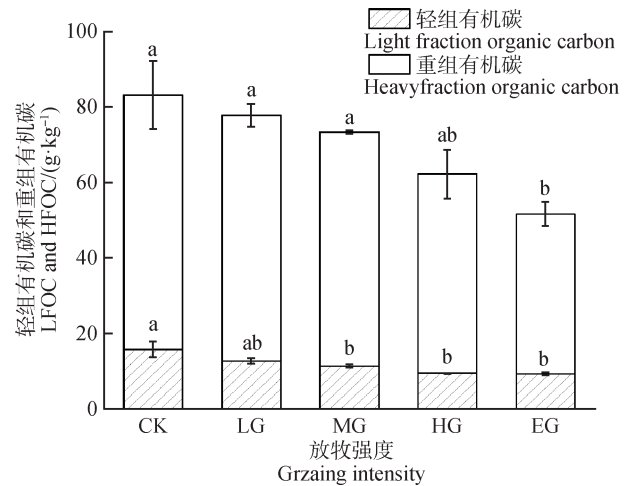


图 4 不同放牧强度高寒草甸土壤轻组有机碳和重组有机碳含量

Fig. 4 Soil light fraction organic carbon and heavy fraction organic carbon content in alpine meadows under different grazing intensities

的 $5/8$ ($P < 0.05$)。由图 5(B)可知,在不同放牧强度下,研究区高寒草甸土壤 DOC 含量介于 $0.06 \sim 0.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,依次为:MG>LG>EG>CK>HG。在 HG 处理下,土壤 DOC 显著低于 LG 和 MG,仅为 LG 的 $2/7$,为 MG 的 $1/7$ ($P < 0.05$);在 EG 处理下,土壤 DOC 亦显著低于 LG 和 MG,仅为 LG 的 $2/3$,为 MG 的 $1/3$ ($P < 0.05$)。

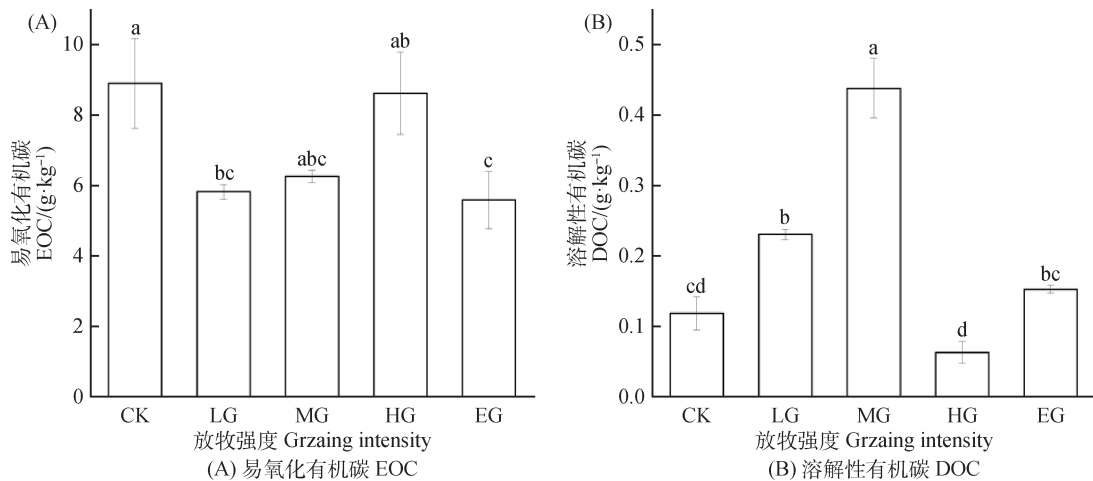


图 5 不同放牧强度高寒草甸土壤易氧化有机碳和溶解性有机碳含量

Fig. 5 Soil easily oxidized organic carbon and dissolved organic carbon content in alpine meadows under different grazing intensities

研究区高寒草甸土壤 EOC/SOC 比值在不同放牧强度下的范围为 7.50%~13.71%(表 2),随着放牧强度的增加,EOC/SOC 比值变化趋势依次为:HG>EG>CK>MG>LG,在 HG 和 EG 处理下,土壤 EOC/SOC 比值显著高于 LG 和 MG ($P < 0.05$)。

高寒草甸土壤 DOC/SOC 比值在不同放牧强度下的范围为 0.1%~0.6%(表 2),随着放牧强度的增加,DOC/SOC 比值变化趋势依次为:MG>EG>LG>CK>EG。在 MG 处理下,土壤 DOC/SOC 比值极显著高于 CK,LG,HG,MG ($P < 0.05$)。

2.3 土壤有机碳及其组分影响因素分析

由图6相关性结果可知,不同放牧强度高寒草甸土壤SOC含量及其组分含量(除DOC含量外)与土壤全氮含量显著正相关($P<0.05$);MAOC,EOC含量与土壤全磷含量显著正相关($P<0.05$),土壤POC含量、DOC含量与土壤容重显著负相关($P<0.01$);土壤DOC含量与土壤pH值显著正相关($P<$

0.001),EOC含量与pH值显著负相关($P<0.01$);土壤DOC含量与土壤含水率显著负相关($P<0.001$),土壤SOC含量、MAOC含量、LFOC含量、EOC含量与土壤含水率显著正相关($P<0.05$);土壤SOC含量、MAOC含量、LFOC含量、HFOC含量、EOC含量与植被地上生物量显著正相关($P<0.05$)。

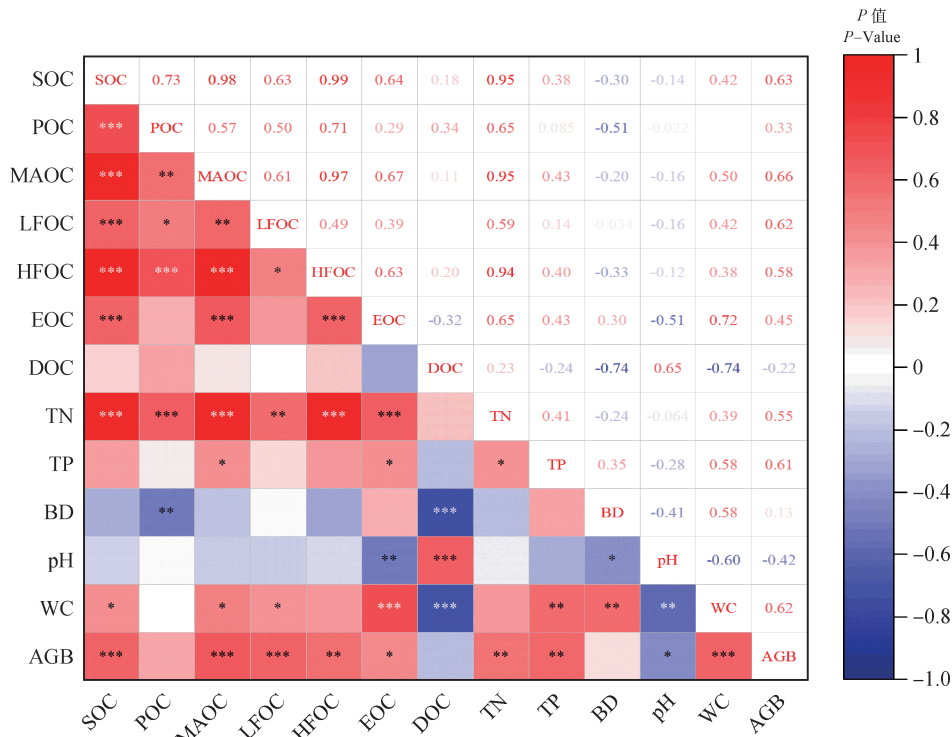


图6 高寒草甸土壤有机碳及其组分与影响因素的相关性

Fig. 6 Correlation between soil organic carbon and its fractions and influencing factors in alpine meadows

注:*,**和***分别代表在0.05,0.01和0.001水平上显著相关;SOC表示土壤有机碳;POC表示颗粒有机碳;MAOC表示矿物结合有机碳;LFOC表示轻组有机碳;HFOC表示重组有机碳;EOC表示易氧化有机碳;DOC表示溶解性有机碳;TN表示全氮;TP表示全磷;BD表示容重;WC表示含水率;AGB表示地上生物量

Note:*,**,and***represent significant associations at the 0.05,0.01, and 0.001 levels, respectively; SOC, Soil organic carbon; POC, Particulate organic carbon; MAOC, Mineral-associated organic carbon; LFOC, Light fraction organic carbon; HFOC, High fraction organic carbon; EOC, Easily oxidation organic carbon; DOC, Dissolved organic carbon; TN, Total nitrogen; TP, Total phosphorus; BD, Bulk density; WC, Water content; AGB, Aboveground biomass

将土壤TN,TP,BD,pH,WC,AGB等因子作为解释变量,SOC及其组分含量作为响应变量,对不同放牧强度高寒草甸土壤理化性质和地上植物量对土壤有机碳及其组分的影响进行冗余分析(RDA)。二维排序结果表明(图7),6个环境因子共同解释了99.46%的土壤有机碳及其组分的变化,且由第1轴决定。因子箭头在排序轴上的投影越长,反映该因子对SOC及其组分的解释率越

高,反之则越低;箭头夹角为锐角,表明指标间为正相关,反之则为负相关,且夹角越小相关性越强。由表3可知,对研究区高寒草甸SOC及其组分影响最大的因子为TN,贡献度达94.5%,TN,AGB,BD,WC对SOC及其组分影响均达到显著水平($P<0.05$)。各因子对土壤有机碳及其组分的影响强弱依次为:TN>AGB>BD>WC>TP>pH。

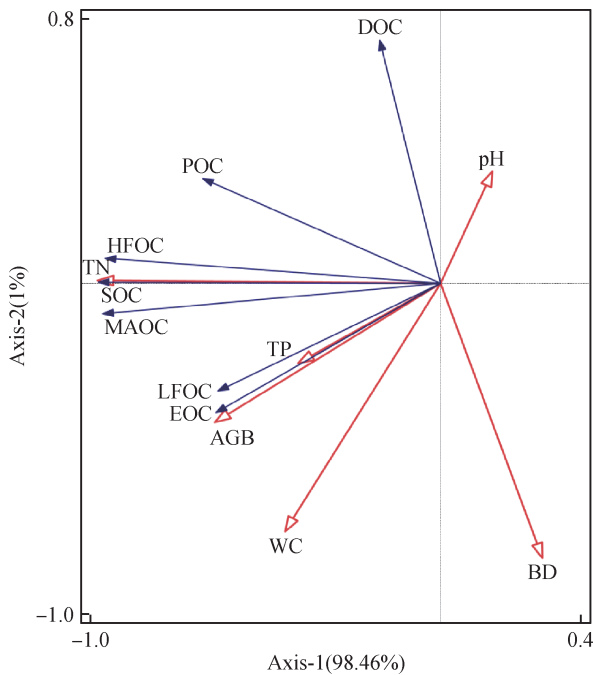


图7 高寒草甸土壤有机碳及其组分与各因子的冗余分析

Fig. 7 Redundancy analysis of soil organic carbon and its fractions with each factors

注: SOC 表示土壤有机碳; POC 表示颗粒有机碳; MAOC 表示矿物结合有机碳; LFOC 表示轻组有机碳; HFOC 表示重组有机碳; EOC 表示易氧化有机碳; DOC 表示溶解性有机碳; TN 表示全氮; TP 表示全磷; BD 表示容重; WC 表示含水率; AGB 表示地上生物量

Note: SOC, Soil organic carbon; POC, Particulate organic carbon; MAOC, Mineral-associated organic carbon; LFOC, Light fraction organic carbon, HFOC, High fraction organic carbon; EOC, Easily oxidation organic carbon; DOC, Dissolved organic carbon; TN, Total nitrogen; TP, Total phosphorus; BD, Bulk density; WC, Water content; AGB, Aboveground biomass

3 讨论

3.1 放牧强度对高寒草甸土壤有机碳库的影响

放牧是草地利用的基本方式,放牧主要通过家畜的采食、践踏影响地上生物量和土壤特征,从而直接或间接地引起土壤碳含量变化^[21]。本研究结果表明,随着放牧强度的增加,土壤有机碳及其组分含量普遍降低。王灵艳等^[22]、阿穆拉等^[23]对青藏

高原高寒草地和荒漠草原的研究,也得出了同样的结论。高寒草甸土壤碳源主要来自植被枯枝落叶、根系、微生物体及其分解合成的腐殖质^[24],本试验中在禁牧和轻度放牧处理下,样地植物生物量高,碳源输入量大,但随着放牧强度的增加,植物生物量显著下降,凋落物年输入量减少,碳源输入量逐渐减少,导致土壤有机碳含量降低。

颗粒有机碳、轻组有机碳、易氧化有机碳和溶解性有机碳通常被描述为有机碳的活性组分,其含量越大,有机碳的活性便越高^[25]。在本研究中,活性有机碳各组分含量在重度和极重度条件下均低于禁牧、轻度和中度处理,可能是在过度放牧条件下,家畜的采食和践踏作用对地上群落特征和土壤理化性质产生负面影响,导致土壤容重增加,含水量减少,植被生物量减少,从而导致有机碳减少,活性变低^[6],与通乐嘎^[26]在内蒙古荒漠草原的研究结果相似。

矿物结合有机碳和重组有机碳属于惰性有机碳的范畴。因其周转较慢,结构稳定复杂,具有固碳作用,所以在一定程度上也反映了土壤碳固持的能力。在本研究中,矿物结合有机碳和重组有机碳在总有机碳中的占比都在80%以上,说明矿物结合有机碳和重组有机碳是土壤碳库中的主要组成部分,且随着放牧强度增加,矿物结合有机碳和重组有机碳含量下降,导致土壤固持有机碳的能力降低,加速了碳库的损失。这也与门欣洋^[27]、刘育红等^[28]在以荒漠草原和高寒草原为对象的研究结果一致。

土壤有机碳组分占总有机碳的比例可以反映土壤碳库的稳定性和养分周转情况,EOC/SOC可反映SOC分解、矿化的难易程度,在一定程度上也可以表征有机碳的稳定性,比值越低,有机碳越稳定,反之越不稳定^[29],在本研究中,重度和极重度放牧条件下EOC/SOC比值升高,说明在重度和极重度放牧条件下,土壤有机碳稳定性较低。DOC/

表3 影响因子解释度和贡献的重要性排序

Table 3 The explanatory degree of impact factors and the importance ranking of contributions

影响因子 Influence factor	解释度 Interpretability / %	贡献度 Contribution degree / %	F	P
全氮 TN	87.5	94.5	161	0.002
地上生物量 AGB	1.8	1.9	3.7	0.04
容重 BD	1.6	1.7	3.7	0.04
含水率 WC	1.2	1.3	3	0.05
全磷 TP	0.4	0.4	0.9	0.392
pH值	0.2	0.2	0.5	0.576

SOC展现了SOC的溶解能力,主要反映SOC的稳定性及损失情况^[30],比值越高SOC的损失越多,稳定性也越差。本研究中高寒草甸在中度放牧处理下,土壤DOC/SOC比值显著升高($P<0.05$),说明中度放牧条件下SOC损失较多,稳定性较差。可见,中度、重度和极重度放牧,显著降低了高寒草甸土壤有机碳稳定性。

3.2 环境因子对高寒草甸土壤有机碳库的影响

放牧通过家畜的活动直接或间接地影响地上植被生物量和土壤理化性质,进而影响土壤有机碳的输入和积累。相关性结果显示,本研究中土壤SOC,MAOC,LFOC,HFOC,EOC含量与植被地上生物量显著正相关($P<0.05$),这表明地上生物量是土壤有机碳及其组分的重要来源,植被生长状况直接影响着土壤有机碳的输入,丰富的地上生物量意味着更多的凋落物和根系分泌物进入土壤,为土壤有机碳的积累提供了物质基础,同时也促进了有机碳的转化和循环^[31],但随着放牧强度的增加,采食、践踏等行为日趋严重,导致地上生物量下降,进而使得植物来源的碳素减少,土壤有机碳含量下降^[32]。有研究认为土壤全氮是制约土壤生态系统碳循环的主要限制因子^[33],本研究也发现土壤SOC,POC,MAOC,LFOC,HFOC,EOC含量与土壤全氮含量呈显著正相关($P<0.001$),且全氮对有机碳及其组分的贡献度达到了94.5%,表明土壤全氮是高寒草甸土壤有机碳形成和积累的重要限制因素,放牧减少了土壤全氮含量,从而在一定程度上加重了土壤氮素缺乏对植物生长的抑制,进而减少土壤碳源的输入。土壤容重也是影响有机碳及其组分的关键因子,土壤POC,DOC含量与土壤容重呈显著负相关($P<0.01$),土壤容重增大时,土壤孔隙度减小,通气性变差,土壤结构变得紧实,限制了根系的生长,减少了微生物的可利用性,从而降低了有机质的分解和转化速率,进一步加剧了土壤有机碳的流失^[34]。

研究发现环境因子对土壤有机碳及其组分的影响强弱依次为:TN>AGB>BD>WC>TP>pH,土壤全氮含量、容重、pH值、含水率、全磷含量和植被地上生物量等因子共同解释了土壤有机碳及其组分的99.86%的变化,说明这些因子不仅与有机碳及其组分之间具有较强的相关性,且共同影响了放牧高寒草甸有机碳及其组分的分布。

4 结论

(1)高寒草甸土壤有机碳及其组分含量随着放牧强度增加逐渐降低。轻度放牧或禁牧有助于土壤有机碳的积累,过度放牧显著降低土壤有机碳及其组分的含量。

(2)土壤活性有机碳中易氧化有机碳与溶解性有机碳在土壤有机碳中占比对放牧响应最敏感,可作为评价土壤碳库的重要指标。过度放牧降低了有机碳积累和稳定性,严重降低了研究区高寒草甸土壤质量。

(3)土壤全氮含量、植被地上生物量与土壤有机碳及其组分呈显著正相关,土壤容重呈负相关。其中土壤全氮贡献度达94.5%,是影响高寒草甸土壤有机碳及其组分变化的重要影响因素。

参考文献

- [1] SCURLOCK J M O, JOHNSON K, OLSON R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 736-753
- [2] 张中华, 周华坤, 赵新全, 等. 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系[J]. *生物多样性*, 2018, 26(2): 111-129
- [3] ZHANG Z H, ZHOU H K, ZHAO X Q, et al. Relationship between biodiversity and ecosystem functioning in alpine meadows of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Biodiversity Science*, 2018, 26(2): 111-129
- [4] ABU-HASHIM M, ELSAYED M, BELAL A E. Effect of land-use changes and site variables on surface soil organic carbon pool at Mediterranean Region[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, 114: 78-84
- [5] MARTY C, HOULE D, GAGNON C. Variation in stocks and distribution of organic C in soils across 21 eastern Canadian temperate and boreal forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 345: 29-38
- [6] BRADFORD M A, WIEDER W R, BONAN G B, et al. Managing uncertainty in soil carbon feedbacks to climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8): 751-758
- [7] 陈思思, 王森, 张楚, 等. 不同放牧强度对呼伦贝尔羊草草甸草原土壤活性有机碳的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(11): 16-24
- [8] CHEN S S, WANG M, ZHANG C, et al. Effects of different grazing intensities on soil active organic carbon in *Leymus chinensis* meadow steppe in Hulunbuir[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(11): 16-24
- [9] COTRUFO M F, RANALLI M G, HADDIX M L, et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(12): 989-994

- [8] VON LÜTZOW M, KÖGEL-KNABNER I, EKSCHMITT K, et al. SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(9): 2183-2207
- [9] LEFROY R D B, BLAIR G J, STRONG W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance[J]. Plant and Soil, 1993, 155(1): 399-402
- [10] MONTEITH D T, STODDARD J L, EVANS C D, et al. Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry[J]. Nature, 2007, 450(7169): 537-540
- [11] HANG M, LI X B, WANG H, et al. Comprehensive analysis of grazing intensity impacts soil organic carbon: a case study in typical steppe of Inner Mongolia, China[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 129: 1-12
- [12] WEI Y Q, ZHANG Y J, WILSON G W T, et al. Transformation of litter carbon to stable soil organic matter is facilitated by ungulate trampling[J]. Geoderma, 2021, 385: 114828
- [13] 赵星宇, 韩国强, 张圣微, 等. 放牧对不同类型草原植物多样性及其碳储量的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5395-5405
- ZHAO X Y, HAN G Q, ZHANG S W, et al. Effects of grazing on plant diversity and their carbon stocks in different types of grasslands[J]. Environmental Science, 2024, 45(9): 5395-5405
- [14] ZHOU G Y, LUO Q, CHEN Y J, et al. Effects of livestock grazing on grassland carbon storage and release override impacts associated with global climate change[J]. Global Change Biology, 2019, 25(3): 1119-1132
- [15] 杨合龙, 孙宗玖, 范燕敏, 等. 短期放牧对昭苏草甸草原土壤活性有机碳组分的影响[J]. 草业科学, 2013, 30(12): 1926-1932
- YANG H L, SUN Z J, FAN Y M, et al. Effects of short-period grazing on soil active organic carbon fractions in Zhaosu meadow steppe[J]. Pratacultural Science, 2013, 30(12): 1926-1932
- [16] WEN H Y, NIU D C, FU H, et al. Experimental investigation on soil carbon, nitrogen, and their components under grazing and livestock exclusion in steppe and desert steppe grasslands, Northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(7): 3131-3141
- [17] CAO J X, WANG X P, SUN X Y, et al. Effects of grazing intensity on soil labile organic carbon fractions in a desert steppe area in Inner Mongolia[J]. SpringerPlus, 2013, 2(Suppl 1): S1
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 22-354
- BAO S D. Soil agricultural chemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 22-354
- [19] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777-783
- [20] 朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 等. 黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系[J]. 环境科学, 2023, 44(1): 444-451
- ZHU Y F, LIU W C, LI J X, et al. Mineralization characteristics of soil organic carbon and its relationship with organic carbon components in artificial *Robinia pseudoacacia* forest in loess hilly region[J]. Environmental Science, 2023, 44(1): 444-451
- [21] 李凌浩, 李鑫, 白文明, 等. 锡林河流域一个放牧羊草群落中碳素平衡的初步估计[J]. 植物生态学报, 2004, 28(3): 312-317
- LI L H, LI X, BAI W M, et al. Soil carbon budget of a grazed *Leymus chinensis* steppe community in the Xilin river basin of Inner Mongolia[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(3): 312-317
- [22] 王灵艳, 杜岩功, 许庆民, 等. 放牧对青藏高原高寒草地土壤有机碳含量的影响[J]. 草原与草坪, 2023, 43(3): 21-27
- WANG L Y, DU Y G, XU Q M, et al. Effects of grazing on soil organic carbon contents in alpine meadow on Tibetan Plateau[J]. Grassland and Turf, 2023, 43(3): 21-27
- [23] 阿穆拉, 赵萌莉, 韩国栋, 等. 放牧强度对荒漠草原地区土壤有机碳及全氮含量的影响[J]. 中国草地学报, 2011, 33(3): 115-118
- A M L, ZHAO M L, HAN G D, et al. Influences of grazing intensity on carbon and nitrogen contents in desert steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(3): 115-118
- [24] CUI X Y, WANG Y F, NIU H S, et al. Effect of long-term grazing on soil organic carbon content in semiarid steppes in Inner Mongolia[J]. Ecological Research, 2005, 20(5): 519-527
- [25] 余健, 房莉, 卞正富, 等. 土壤碳库构成研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4829-4838
- YU J, FANG L, BIAN Z F, et al. A review of the composition of soil carbon pool[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(17): 4829-4838
- [26] 通乐嘎, 赵斌, 吴玲敏. 放牧对内蒙古荒漠草原土壤理化性质和有机碳组分的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(9): 1602-1609
- TONG L G, ZHAO B, WU L M. Effect of grazing on soil organic carbon fractions and soil physical-chemical properties in desert steppe in Inner Mongolia[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(9): 1602-1609
- [27] 门欣洋. 放牧强度对荒漠草原土壤有机碳组分及其稳定性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023: 11-33
- MEN X Y. Effects of grazing intensity on soil organic carbon fractions and its stability in desert steppe[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023: 11-33
- [28] 刘育红, 魏卫东, 温小成, 等. 三江源退化高寒草原土壤有机碳组分分布研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1370-1376
- LIU Y H, WEI W D, WEN X C, et al. Distribution study of soil organic carbon fraction on degradation alpine grassland in the source area of three major rivers of China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(6): 1370-1376
- [29] 高小龙, 王幼奇, 白一茹, 等. 闽海城市湿地典型植被群落土

- 壤活性有机碳组分分布特征[J]. 草地学报, 2022, 30(6): 1441-1449
- GAO X L, WANG Y Q, BAI Y R, et al. Distribution characteristics of soil labile organic carbon fractions in typical vegetation communities of the Yuehai urban wetland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(6): 1441-1449
- [30] 陈志杰, 韩士杰, 张军辉. 土地利用变化对漳江口红树林土壤有机碳组分的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2379-2385
- CHEN Z J, HAN S J, ZHANG J H. Effects of land use change on soil organic carbon fractions in mangrove wetland of Zhangjiangkou[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(9): 2379-2385
- [31] 林春英, 李希来, 孙海松, 等. 黄河源高寒湿地有机碳组分对不同退化程度的响应[J]. 草地学报, 2021, 29(7): 1540-1548
- LIN C Y, LI X L, SUN H S, et al. Responses of soil organic carbon component on different degrees of degradation of alpine wetland in the source of Yellow River [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(7): 1540-1548
- [32] 王雪婷, 乌云娜, 王洋, 等. 草原退化过程中土壤碳氮分布与群落生物量的关系[J]. 黑龙江农业科学, 2014(9): 104-110
- WANG X T, WU Y N, WANG Y, et al. The relationship between soil organic carbon and nitrogen distribution and community biomass in the process of grassland degradation[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2014(9): 104-110
- [33] 王幼奇, 夏子书, 包维斌, 等. 银川鸣翠湖国家湿地公园香蒲、荷花、石菖蒲和芦苇生长区土壤有机碳及其组分含量对比研究[J]. 湿地科学, 2020, 18(3): 294-302
- WANG Y Q, XIA Z S, BAO W B, et al. Comparison of contents of soil organic carbon and its components in growth regions of *Typha angustata*, *Nelumbo nucifera*, *Acorus tatarinowii* and *Phragmites australis* in Yinchuan Mingcui lake national wetland park [J]. Wetland Science, 2020, 18(3): 294-302
- [34] 袁淑雅, 贺晶, 苏德荣. 降水格局变化和放牧对草地土壤磷转化影响的研究进展[J]. 草地学报, 2024, 32(1): 25-36
- YUAN S Y, HE J, SU D R. Advances in the effects of precipitation pattern change and grazing on soil phosphorus conversion in grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(1): 25-36

(责任编辑 刘婷婷)